



УДК 621.314.6

2.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА КАРБИД-КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

SILICON-CARBIDE SEMICONDUCTORS AS BASE FOR ACTIVE RECTIFIER

Харитонов Сергей Александрович, д-р.техн. наук, зав. каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Коробков Дмитрий Владиславович, старший преподаватель, м.н.с. каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Макаров Денис Владимирович, канд. техн. наук, доцент каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Волков Александр Геннадиевич, м.н.с. каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Сидоров Андрей Викторович, аспирант каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Sergey A. Kharitonov, Doctor Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marxa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Dmitriy V. Korobkov, Researcher, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marxa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Denis V. Makarov, Cand. Tech. Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marxastreet, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Alexander G. Volkov, Researcher, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marxa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Andrey V. Sidorov, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marxastreet, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Аннотация: В докладе представлена концепция построения преобразователя частоты по типу активного выпрямителя на сверхмалые массо-габаритные показатели (до 0,4 кг/кВт) с использованием карбид-кремниевых транзисторов. В основе концепции заложены принципы наращивания мощности преобразователей за счет параллельного соединения преобразователей меньшей мощности (модулей). Алгоритм управления всем преобразователем реализован на базе микроконтроллера и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Совокупность достоинств микросхем, а также ряд технических решений обеспечили независимое централизованное управление 36 транзисторами на постоянной частоте коммутации 75 кГц. Эквивалентная пульсность тока для рассматриваемого трехфазного преобразователя составляет 450 кГц. В работе представлены промежуточные результаты испытаний образца на номинальную мощность 25 кВт.

Abstract: The report introduces the concept of building the inverter-type active rectifier on ultra-small weight and size parameters (up to 0.4 kg / kW). The concept based on the principles of increasing converters power due to the parallel connection of lower power converters (modules). The control algorithm is implemented on microcontroller and programmable logic integrated circuits (FPGAs) co-working. Set of advantages applied digital circuits, as well as a number of technical solutions that organize synchronous and discontinuous operation of two chips in a single computational cycle, ensure the independence of the centralized management of 36 transistors on a constant switching frequency of 75 kHz. Equivalent frequency of ripples in current for the considered three-phase inverter is 450 kHz. The paper presents the interim results of the test sample to the nominal power of 25 kW.

Ключевые слова: активный выпрямитель; карбид-кремниевые транзисторы; модульность; цифровой алгоритм управления; преобразователь.

Key words: active rectifier; silicon-carbide semiconductors; interleaved parallel structure; digital control system; power converter.

ВВЕДЕНИЕ

Новые технические достижения в полупроводниковой промышленности всегда способствуют развитию в сфере производства преобразовательных устройств. Появление на рынке новых типов транзисторов позволяет вывести эти устройства на новый качественный уровень. Повышение качественного уровня чаще всего заключается в снижении массогабаритных показателей за счет увеличения частот коммутации полупроводниковых приборов [1] и применения нестандартных алгоритмов управления, позволяющих решить целый ряд задач по улучшению энергетических показателей преобразовательного устройства [1]. В этой связи, с появлением карбид-кремниевых (SiC) транзисторов такие устройства, как активный выпрямитель, могут теперь рассматриваться как вполне достойный конкурент базовым решениям задач преобразования переменного тока в постоянный, используемым на сегодняшний день. Перспективность применения активного выпрямителя отмечалась многими исследователями в этой области [2]. Главным недостатком этого преобразователя, ограничивающим его применение, был и остается высокий уровень коммутационных потерь в полупроводниковых элементах, что в итоге приводит к значительному увеличению плотности рассеиваемой энергии при попытках уменьшения габаритов конструкции. И только в последние годы, расширение области применения транзисторов на основе SiC структуры позволило реально оценить перспективность рассматриваемого схемотехнического решения. В силу известных особенностей структуры карбид-кремния, таких как существенно низкие проходные емкости при высоком значении напряжения пробоя, представляется возможность в несколько раз повысить частоту коммутации прибора относительно рабочих частот кремниевых аналогов. Повышение частоты коммутации тока, очевидно, позволяет снизить габариты пассивных элементов, но в то же время ставит перед разработчиками ряд новых задач, связанных с оптимизацией конструктивного исполнения. На базе кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета уже были проведены ряд НИОКР на тему разработки оптимизированных полупроводниковых преобразователей по массогабаритным критериям в диапазоне мощностей 30-120 кВт. На основании полученного опыта была разработана концепция построения высокочастотного полупроводникового преобразователя по типу активного выпрямителя, о котором далее пойдет речь, на базе карбид-

кремниевых транзисторов. На сегодняшний день коллектив кафедры электроники и электротехники проводит ряд заключительных испытаний разработанного образца на номинальную мощность 25 кВт, работающий от стандартной промышленной сети 0,4 кВ.

БАЗОВАЯ СТРУКТУРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В этом разделе будут освещены технические решения, формирующие базовую концепцию построения высокочастотного преобразователя на предельно низкие (имеется в виду снижение соотношения кг/кВт) массогабаритные показатели.

Повышение мощности преобразовательного устройства в общем случае может производиться в двух направлениях, характеризующихся способом соединения нескольких дискретных модулей. При последовательном соединении образуются многоуровневые преобразователи, а при параллельном соединении - известные в зарубежной литературе под термином *Interleaved* преобразователи. В обоих случаях разными способами реализуется увеличение эквивалентной пульсности тока, что позволяет снизить требования к пассивным фильтрам. По этому критерию достаточно сложно и, наверное, даже не имеет смысла определить явные преимущества той или иной структуры. Для выбора направления оптимизации в этом случае следует задаться такими критериями, как доступность полупроводниковых приборов, активные потери на основных элементах, надежность устройства в целом. Все три перечисленных критерия очевидны и говорят в пользу параллельного способа. Базовая структура разработанного преобразователя по типу активного выпрямителя представлена на рис. 1.

Преобразователь состоит из двух симметричных частей, расположенных по обе стороны одного радиатора. Цифровая система управления на базе микроконтроллера и ПЛИС (рис. 2), осуществляющих расчет алгоритма управления и задания режимов работы, расположены над радиатором в центре всего преобразователя, тем самым обеспечивая симметричность конструкции (рис. 3). При построении многомодульных преобразователей с высокочастотным управлением силовых ключей к системе управления (СУ) предъявляются жесткие требования по обработке данных с датчиков напряжений и токов. Зачастую, скорость обхода алгоритмов управления ограничивается частотой выборки АЦП цифровой системы. Для обеспечения высокой скорости были задействованы дополнительные АЦП последовательного приближения, не входящие в

базовый набор периферийных устройств микроконтроллера. Задача управления этими АЦП возложена на микросхему ПЛИС. Причем, частота выборки, в таком случае, ограничивается только свойствами самих микросхем АЦП и ПЛИС, которые по частотным свойствам на порядок превосходят те же показатели у стандартных микроконтроллеров. Это преимущество в скорости обработки данных ПЛИС позволило

расширить полосу пропускания алгоритма управления, поскольку в цепи обратной связи известное влияние дискретизации сведено к минимуму за счет избыточности выборок с усреднением на периоде несущего сигнала, так называемого метода оверсэмплинга (*oversampling*).

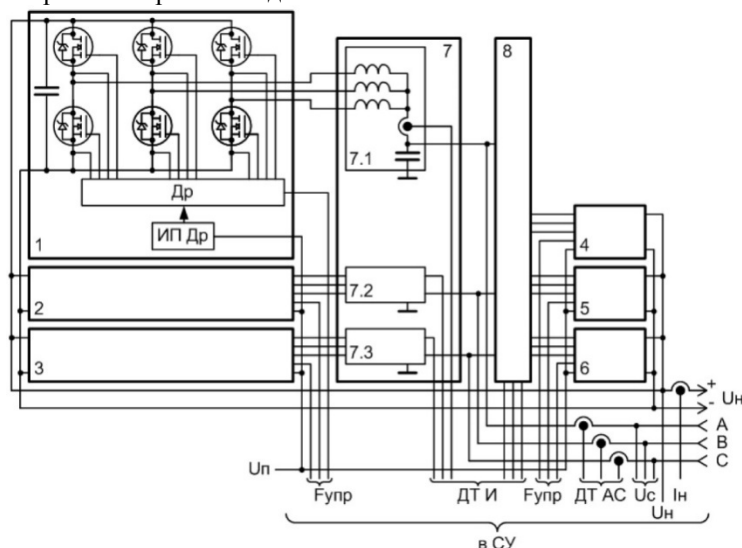


Рис. 1. Структурная схема преобразователя

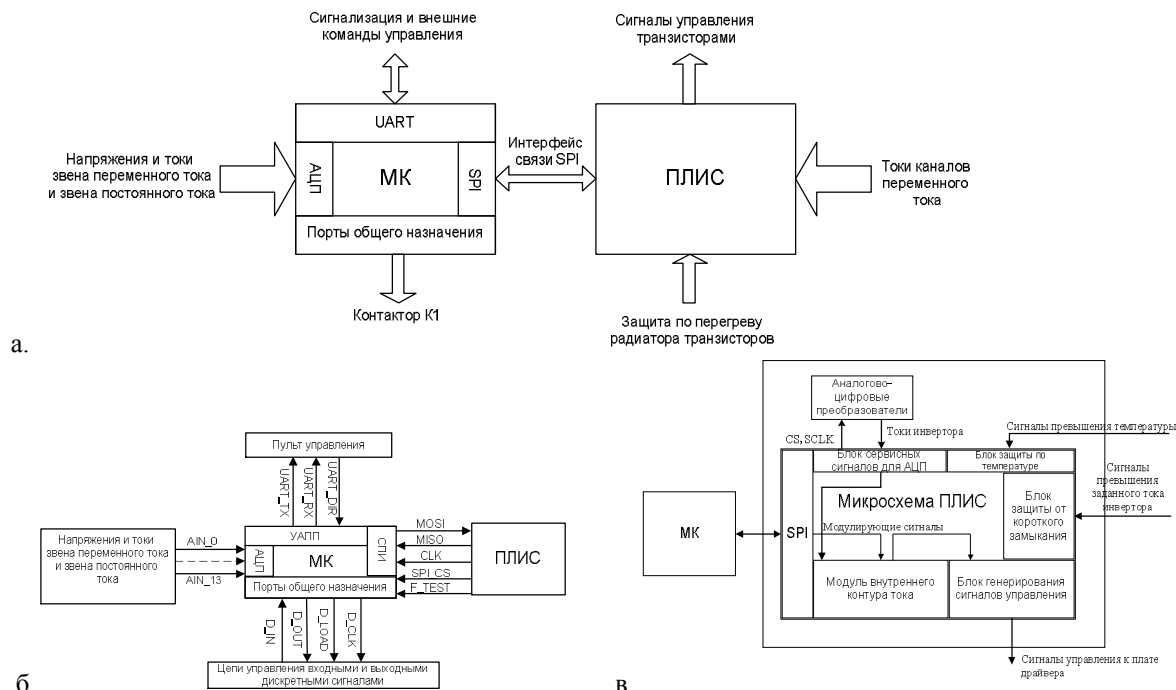


Рис. 2. Структурная схема организации цифровой системы управления: а. Общая схема; б. Детализация СУ в части микроконтроллера; в. Детализация СУ в части ПЛИС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В этом разделе будут представлены результаты испытаний преобразователя по типу активного выпрямителя, номинальной мощностью 25 кВт (с возможной 1.5-кратной перегрузкой), полученные

на текущий момент. Параметры преобразуемого напряжения следующие: величина выходного постоянного напряжения по требованиям – 610 В \pm 2%; уровень питающего трехфазного напряжения сети 380 В +10% и – 15%. На текущий момент закончены испытания отдельных модулей

2. Силовые полупроводниковые преобразователи для электроприводов переменного тока

преобразователя при номинальном и перегрузочном токе (рис. 4). На основании результатов этих испытаний следует отметить достаточно низкий уровень перенапряжений на транзисторе во время коммутации ключа без использования дополнительных снабберных цепей – не более 50 В относительно 600 В в звене постоянного тока.

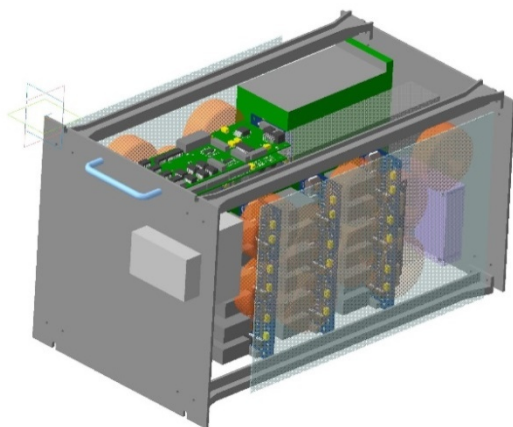


Рис. 3. Трехмерная модель основных узлов преобразователя в собранном виде.

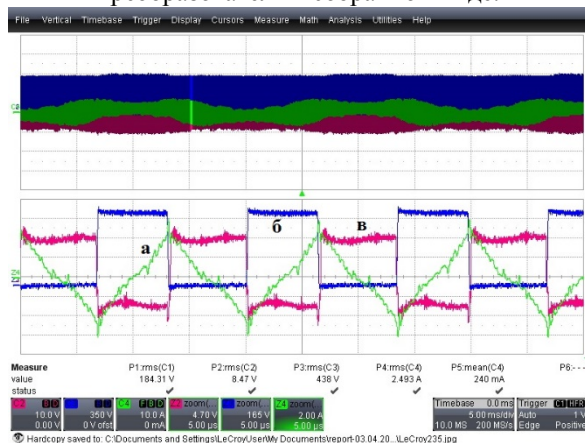


Рис. 4. Процесс коммутации транзисторов в одной стойке модуля преобразователя. Представлены графики тока (а) в индуктивности, напряжения между коллекторами эмиттером транзистора (б) на фоне сигнала управления на затворе (в).

Такой результат обусловлен сверхнизкими емкостями в структуре самого полупроводника и особенностями обратного диода в составе одного прибора при условии грамотного проектирования силовых высокочастотных цепей.

Также проведены испытания всего преобразователя на уровне входных напряжений питающей сети 385 В при чистом (0%) холостом ходе нагрузки (рис. 5); 10% от номинального значения выходной мощности (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлена концепция построения преобразователя на сверхнизкие массо-габаритные показатели.



Рис. 5. Режим холостого хода. Ток фазы сети (а), фазные напряжения (б, в) и напряжение в звене постоянного тока (г).

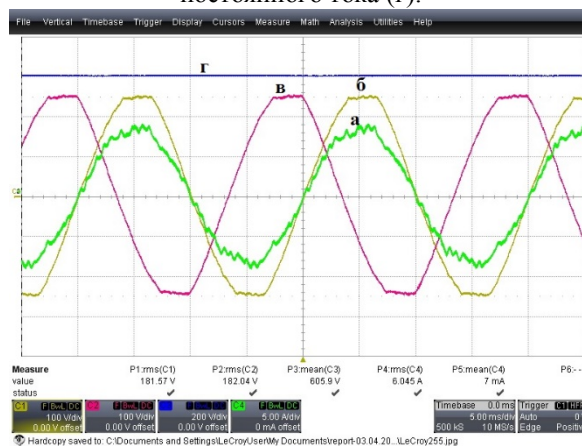


Рис. 6. Режим 10% нагрузки. Ток фазы сети (а), фазные напряжения (б, в) и напряжение в звене постоянного тока (г).

В основе концепции заложены последние достижения в области проектирования преобразователей: модульный принцип построения со сдвигом несущего сигнала широтно-импульсной модуляции; карбид-кремниевые транзисторы, обеспечивающие значительное снижение в коммутационных потерях; составной цифровой комплекс на базе микроконтроллера и ПЛИС для реализации высокоскоростного алгоритма управления. Предварительные испытания подтверждают ряд концептуальных нововведений и технических решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. Электрический самолёт: от идеи до реализации //Машиностроение, 2010. – 288с. с табл. и ил.
2. Харитонов С.А. Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный выпрямитель» (Математическая модель) // Электротехника, 2009, №12, М., С.33-41